

ผลของระยะเวลาการเก็บรักษาในสภาพแช่แข็งต่อคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของเนื้อหมู

The Effect of Freezing Storage Duration on Physical and Chemical Properties of Pork Meat

سوبงกช โตไพบูลย์ เอกรินทร์ อินประมูล มาลัยพร วงค์แก้ว รัตติยากร ชาตตนนท์ และวรารัลญูช ฉิมพะเนาว์*

Subongkoj Topaiboul, Aekarin Inpramoon, Malaiporn Wongkaew

Rattiyakorn Chattanon and Warawaran Shimbhano*

วิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่ 50300

College of Integrated Science and Technology, Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Mai, Thailand 50300

*Corresponding author: warawaran@rmutl.ac.th

Received: November 20, 2022

Revised: May 19, 2023

Accepted: June 19, 2023

Abstract

Regarding of inconsistency in texture of emulsion sausage made of some frozen pork batches found at the Livestock Development and Research Center, Chiang Mai, this paper aimed to investigate the effect of freezing storage duration on the meat's physical and chemical properties and to specify a suitable storage duration. The fresh pork tenderloin was selected with similar size, color, and weight. Then washed with clean water and trimmed by separating only the red meat, each piece weighs about 500 grams, and packed in a zip lock bag. For 6 months, pork meat was stored at -40°C and sampled to analyse for its physical properties (color, texture, and microstructure) and chemical properties (pH value, moisture content, thawing loss, protein, and fat contents) each month. The results showed that the meat color changed from a bright red to a darker with paler red tone during the freezing storage. The freezing storage altered some texture properties of pork meat which demonstrated by a decrease of springiness and an increase of hardness and chewiness after 3 months. These also corresponded to the microstructure photos. The pH value of the frozen pork meat tended to increase until the 4th month and slightly decreased thereafter. There was no difference in the moisture content between fresh and frozen pork meat while the thawing loss increased. In terms of protein, the detected amount seemed unchanged but the fat content decreased after 2 months. The overall analysis results implied some deteriorations of pork meat during frozen storage and suggested that the use of more than 3-month frozen storage should be avoided.

Keywords: pork meat, freezing storage, physical properties, chemical properties

บทคัดย่อ

สืบเนื่องจากปัญหาที่พบ ณ ศูนย์วิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ปศุสัตว์ จังหวัดเชียงใหม่ คุณภาพเนื้อสัมผัสของไส้กรอกชนิดอิมัลชันที่ผลิตจากเนื้อหมูแช่แข็งมีความแตกต่างจากการแปรรูปด้วยเนื้อหมูสดในบางรอบการผลิต งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาผลของการเก็บรักษาในสภาพแช่แข็งต่อคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของเนื้อหมู เพื่อระบุระยะเวลาที่เหมาะสมในการเก็บรักษาเนื้อหมูแช่แข็งก่อนนำมาแปรรูปเป็นไส้กรอก โดยคัดเลือกเนื้อหมูสดใหม่ส่วนสันนอกที่มีขนาด สี และน้ำหนักใกล้เคียงกัน จากนั้นนำไปล้างน้ำสะอาดและทำการตัดแต่ง โดยเลาะแยกเอาแต่ส่วนของเนื้อแดง โดยให้แต่ละชิ้นมีน้ำหนักชิ้นละประมาณ 500 กรัม บรรจุใส่ถุงซิปล็อค เก็บรักษาเนื้อหมูที่อุณหภูมิ -40°C . เป็นระยะเวลา 6 เดือน และวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ค่าสี ลักษณะเนื้อสัมผัส และโครงสร้างทางจุลภาค และคุณสมบัติทางเคมี ได้แก่ ค่าความเป็นกรดต่าง ปริมาณความชื้น การสูญเสียน้ำจากการทำละลายน้ำแข็ง ปริมาณโปรตีน และปริมาณไขมัน ผลการศึกษาพบว่าระหว่างการเก็บรักษา ในสภาพแช่แข็งเนื้อหมูมีการเปลี่ยนแปลงสีจากสีแดงสดเป็นสีโทนแดงที่มีความคล้ำมากขึ้นและมีสีซีดจางลง ค่าความยืดหยุ่นลดลง ค่าความคงทนต่อการบดเคี้ยวที่บ่งบอกถึงความเหนียวเพิ่มขึ้น และมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนภายหลังการเก็บรักษาไว้เป็นระยะเวลา 3 เดือน สอดคล้องกับภาพการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคค่าความเป็นกรดต่างของเนื้อหมูแช่แข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นไปจนถึงเดือนที่ 4 และลดลงเล็กน้อยหลังจากนั้น โดยความชื้นในเนื้อสัตว์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่พบการสูญเสียน้ำจากการทำละลายน้ำแข็งของเนื้อหมูเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาการแช่แข็ง สำหรับปริมาณโปรตีนไม่มีการเปลี่ยนแปลง ในขณะที่ปริมาณไขมันลดลงภายหลังการเก็บรักษาไว้เป็นระยะเวลา 2 เดือน จากการวิเคราะห์ทั้งหมดบ่งชี้การเสื่อมสภาพของเนื้อหมูและชี้ให้เห็นว่าไม่ควรนำเนื้อหมูที่เก็บรักษาไว้นานเกิน 3 เดือน มาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์

คำสำคัญ: เนื้อหมู การเก็บรักษาในสภาพแช่แข็ง
คุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางเคมี

คำนำ

ศูนย์วิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ปศุสัตว์ จังหวัดเชียงใหม่ เป็นหน่วยงานที่มีภารกิจในการศึกษาวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีด้านการปศุสัตว์ มีการผลิตและจำหน่ายผลิตภัณฑ์ประเภทนมและเนื้อสัตว์ ได้แก่ นมพร้อมดื่ม โยเกิร์ต ซีส เนื้อสัตว์ตัดแต่ง ลูกชิ้น กุนเชียง แฮม และไส้กรอกอิมัลชัน (ไส้กรอกเวียนนา แพรงค์เฟอร์เตอร์) เป็นต้น ด้วยลักษณะการผลิตที่ไม่สามารถแปรรูปได้ทันทีในกระบวนการแปรรูปไส้กรอกเนื้อหมูชำแหละบางส่วนจึงถูกนำไปแช่แข็ง (อุณหภูมิประมาณ -35 ถึง -40°C .) เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาก่อนนำมาแปรรูป แต่เมื่อนำเนื้อหมูที่ผ่านการแช่แข็งมาใช้สังเกตว่าลักษณะเนื้อสัมผัสของส่วนผสมไส้กรอกที่ได้มีความแตกต่างจากการแปรรูปด้วยเนื้อหมูสด ส่งผลต่อคุณภาพเนื้อสัมผัสไส้กรอกที่ได้ ซึ่งความสดของเนื้อหมูมีความสำคัญต่อทั้งกลิ่น รสชาติ และคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของไส้กรอก (Leygonie *et al.*, 2012) ไส้กรอกอิมัลชันเกิดจากการผสมระหว่างโปรตีนในเนื้อสัตว์ ไขมัน และน้ำเข้าด้วยกัน (Rattanapanone, 2014) เนื้อสัมผัสที่ดีของไส้กรอกจึงเป็นผลมาจากความเสถียรในระบบอิมัลชันของส่วนผสม ได้แก่ ความสม่ำเสมอเรียบเนียน ความยืดหยุ่น เนื้อแน่นไม่ยุ่ยและไม่นิ่มเกินไป ไม่มีการแยกตัวของหยดน้ำมันออกจากไส้กรอก กระบวนการแช่แข็งเป็นเทคนิคการเก็บรักษาเนื้อสัตว์ที่เป็นที่นิยม แต่การแช่แข็งมักทำให้เกิดความเสียหายแก่เนื้อสัมผัสของเนื้อสัตว์ เนื่องจากผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างของเนื้อเยื่อ (Mousavi *et al.*, 2007) ผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นสามารถสังเกตได้โดยตรงโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่งกราด (SEM) (Russell *et al.*, 1999) การแช่แข็งส่งผลต่อคุณภาพของเนื้อสัตว์ ซึ่งเกิดขึ้นในลักษณะเดียวกันทั้งเนื้อวัว เนื้อหมู เนื้อไก่ และเนื้อปลา โดยการแช่แข็ง (-5°C .) จะก่อให้เกิด

ผลึกน้ำแข็งขึ้นในเส้นใยกล้ามเนื้อ เมื่อนำเนื้อสัตว์มาทำการละลายผลึกน้ำแข็งในเส้นใยจะละลายออกมาก ซึ่งเป็นผลให้เกิดการสูญเสียเนื้อ และยังพบว่าไขมันบางส่วนหลุดออกมาพร้อมกับน้ำเหล่านั้น เป็นผลให้เนื้อสัตว์ที่ผ่านการแช่แข็งมีคุณภาพลดลง (Mousavi *et al.*, 2007) มีรายงานวิจัยในเนื้อหมูที่ผ่านการแช่แข็งเป็นระยะเวลา 45 วัน พบว่ามีปริมาณโปรตีนลดลง การแช่แข็งยังทำให้เกิดเปลี่ยนแปลงของโปรตีน โดยทำให้เนื้อหมูมีลักษณะเนื้อสัมผัสด้านความยืดหยุ่นลดลง และยังมีผลต่อการเร่งปฏิกิริยาการเกิดออกซิเดชันของไขมันที่ทำให้เกิดกลิ่นหืนในเนื้อหมูแช่แข็ง (Medic *et al.*, 2018) โดยการศึกษาของ Choi *et al.* (2018) ได้นำเนื้อแกะมาแช่แข็งที่อุณหภูมิ -50, -60 และ -80°ซ. พบว่าเมื่อระยะเวลาผ่านไป 3 เดือนเนื้อแกะมีคุณภาพลดลง โดยพบว่าเนื้อแกะแช่แข็งมีการสูญเสียจากการทำละลายน้ำแข็ง (Thawing loss) เพิ่มขึ้น ความสามารถในการอุ้มน้ำลดลง และเนื้อสัมผัสแข็งขึ้น Reddy *et al.* (1995) ศึกษาพบว่าการเก็บรักษาปลาพิงค์เพิร์ชในน้ำแข็งก่อนนำไปบดและแปรรูป ทำให้ค่าการละลายของโปรตีนลดลง (Protein solubility) ความสามารถในการเกิดอิมัลชันลดลง (Emulsion stability) ความสามารถในการจับยึดน้ำลดลงเช่นกัน (Water binding stability) คุณสมบัติดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับการละลายของโปรตีน และเป็นตัวบ่งชี้ถึงการสูญเสียของโปรตีนกล้ามเนื้อของเนื้อสัตว์ ซึ่งเป็นผลมาจากการจับตัวกันของโปรตีน (Aggregation) ในระหว่างการเก็บรักษาในสภาพแช่แข็ง (Chantararat *et al.*, 2005)

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการเก็บรักษาในสภาพแช่แข็งต่อคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของเนื้อหมู เพื่อระบุระยะเวลาที่เหมาะสมในการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -40°ซ. เพื่อนำข้อมูลไปใช้วิเคราะห์ร่วมกับการพัฒนาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไส้กรอกเนื้อหมูนอกจากนี้ข้อมูลเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของเนื้อหมูระหว่างการเก็บรักษาในสภาพแช่แข็งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์เนื้อหมูอื่น ๆ ได้เช่นกัน การเก็บรักษาที่อุณหภูมิดังกล่าวนั้น ถูกกำหนดขึ้นจาก

อุณหภูมิของการเก็บรักษาอาหารแช่แข็ง (ต่ำกว่า -18°ซ.) และเป็นอุณหภูมิที่มีความใกล้เคียงกับอุณหภูมิในการเก็บรักษาเนื้อหมูของศูนย์วิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ปศุสัตว์

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมวัตถุดิบ

เนื้อหมูที่ใช้เป็นส่วนส้นนอกจากร้านขายส่งเนื้อหมูอำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา จำนวน 10 กิโลกรัม โดยคัดเลือกเนื้อหมูสดใหม่ที่มีขนาด สี่ และน้ำหนักใกล้เคียงกัน จากนั้นนำไปล้างน้ำสะอาดและทำการตัดแต่งชิ้นส่วนเนื้อ โดยเลาะแยกเอาแต่ส่วนของเนื้อแดง นำเศษเนื้อ เอ็น และพังผืดแยกออกจากกัน ตัดแต่งส่วนของเนื้อแดงให้มีลักษณะคล้ายสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยให้แต่ละชิ้นมีน้ำหนักชิ้นละประมาณ 500 กรัม บรรจุใส่ถุงซิปล็อคนำไปเก็บรักษาในตู้แช่แข็ง (Freezer, Binder GmbH, Germany) ที่อุณหภูมิ -40°ซ. โดยตู้แช่แข็งที่ใช้เป็นแบบที่ไม่มีอากาศไหลเวียน ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับตู้แช่แข็งที่ใช้เก็บรักษาเนื้อสัตว์ในโรงงานแปรรูปทั่วไป รวมถึงที่ใช้ในศูนย์วิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ปศุสัตว์ โดยเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 6 เดือน ทุกๆ เดือน เนื้อหมูแช่แข็งจะถูกนำมาทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี โดยเปรียบเทียบกับเนื้อหมูสด ก่อนการวิเคราะห์เนื้อหมูแช่แข็งจะถูกนำมาละลายที่อุณหภูมิ 4°ซ. เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของเนื้อหมู

การวัดค่าสีของเนื้อหมูด้วยเครื่องวัดสี (Colorimeter, ColorFlex EZ, Hunter Associates Laboratory, USA) โดยวัดค่าสีบนผิวของเนื้อหมูบริเวณทั้งสองด้าน ด้านละ 5 จุด ค่าสีที่วัดได้บันทึกเป็นค่า L* (Lightness), a* (Redness) และ b* (Yellowness) (McGuire, 1992) การวัดเนื้อสัมผัสของเนื้อหมู โดยใช้เครื่อง Texture analyzer (Texture Profile Analysis, TPA, CT3 10K, BrookfieldD, USA) โดยประยุกต์จากวิธีของ Huidobro *et al.* (2005) โดยเตรียมตัวอย่างเนื้อหมู

ขนาด 5x5x2 ซม. ใช้หัววัดชนิดรูปทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 1 ซม. กดลงที่ชิ้นเนื้อความลึก 6 มม. ทำการทดสอบ 6 ชิ้น โดยวิเคราะห์ชิ้นละ 5 จุด โดยหัวทดสอบจะกดบนเนื้อหมูจำนวน 2 ครั้ง บันทึกลักษณะเนื้อสัมผัสที่ได้จากกราฟ คือ ความแข็ง (Hardness, นิวตัน (N)) ซึ่งวัดจากจุดสูงสุดที่สุดของพีคในการกดครั้งแรก ความสามารถในการเกาะรวมตัวกัน (Cohesiveness) เป็นอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ใต้กราฟการกดครั้งที่สองต่อพื้นที่ใต้กราฟการกดครั้งแรก ความยืดหยุ่น (Springiness) คือ อัตราส่วนระหว่างระยะทางที่หัววัดเคลื่อนที่ จนกระทั่งเกิดพีคของการกดครั้งที่สองและการกดครั้งแรก และ ความทนต่อการบดเคี้ยว (Chewiness index) คือ ผลคูณระหว่างความเหนียว (Gumminess) และความยืดหยุ่น

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค (Microstructure) โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM, Model Prisma E, Thermo Scientific, USA) โดยเตรียมตัวอย่างเนื้อหมูให้มีขนาด 4x4x0.5 ซม. จากนั้นนำไปทำแห้งในสถานะแช่เยือกแข็ง โดยเครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (freeze dryer, Alpha 1-4 LD Plus, Christ, Germany) จากนั้นตัดตัวอย่างให้มีขนาด 1x1x0.1 ซม. นำไปวางบนแท่นอะลูมิเนียม ฉาบตัวอย่างด้วยทองคำหนา 250-300 นาโนเมตร เป็นเวลา 2 นาที จากนั้นนำตัวอย่างไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 3,000 เท่า โดยทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของเนื้อหมู

การวัดค่าความเป็นกรดต่าง (pH value) ด้วยวิธีของ (AOAC, 2000) โดยนำเนื้อหมูจำนวน 5 กรัม ปั่นรวมกับน้ำกลั่น 25 มล. นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง pH Meter (PHTESTR30, EUTECH, Singapore) โดยทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น (AOAC, 2000) โดยนำเนื้อหมูประมาณ 5 กรัม มาใส่ในจานอะลูมิเนียม

ที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอน จากนั้นนำไปอบแห้งในตู้อบลมร้อน (UF450, Memmert, Germany) ที่อุณหภูมิ 105°C. เป็นเวลาประมาณ 24 ชั่วโมง จนกระทั่งได้น้ำหนักคงที่ จากนั้นคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานเปียก (%MC_{wb}) โดยทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

การวิเคราะห์การสูญเสียน้ำจากการทำละลายน้ำแข็ง (Thawing loss) ของเนื้อหมู โดยวิธีของ Mortensen *et al.* (2006) โดยมีนำเนื้อหมูแช่แข็งจำนวน 5 กรัม มาทำการชั่งน้ำหนัก (M1) จากนั้นนำไปละลายที่อุณหภูมิ 4°C. เป็นเวลา 18 ชั่วโมง จากนั้นนำเนื้อหมูที่แช่แข็งน้ำหนักอีกครั้ง (M2) โดยทำการวิเคราะห์ 5 ซ้ำ การสูญเสียน้ำของเนื้อหมูถูกนำมาคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ (% thawing loss) ดังนี้

$$\% \text{thawing loss} = \left(\frac{M1 - M2}{M1} \right) \times 100$$

การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนด้วยเครื่อง Dumas combustion (5E-TCN2200, CKIC, China) (Etheridge *et al.*, 1998) โดยใช้ตัวอย่างเนื้อหมูจำนวน 250 มก. นำไปเผาที่อุณหภูมิ 850°C. ไอของสารที่ได้จากการเผาไหม้จะถูกพาเข้าสู่เครื่องตรวจวัด แสดงผลเป็นปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด และสามารถคำนวณเป็นปริมาณโปรตีนโดยคูณด้วยแฟกเตอร์ตัวเลข 6.25 โดยทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ ส่วนการวิเคราะห์ปริมาณไขมันด้วยเทคนิคการสกัดแบบซอกซ์เลต (Soxhlet extraction) (AOAC, 2000) โดยใช้ตัวอย่างเนื้อหมูจำนวน 3 กรัม โดยทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

การวิเคราะห์ทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design: CRD) เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยพหิตามันต์โดยใช้วิธีของ Tukey (Tukey's honestly significant difference test หรือ Tukey's HSD) ด้วยโปรแกรม SPSS 11.5 จำนวนตัวอย่างไม่น้อยกว่า 3 ซ้ำ

ผลการวิจัยและวิจารณ์

การเปลี่ยนแปลงค่าสี

การเปลี่ยนแปลงค่าสีของเนื้อหมูรายงานเป็นค่า L^* , a^* และ b^* ดังแสดงใน Table 1 การเก็บรักษาในสภาพแช่แข็งที่อุณหภูมิ -40°C . มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของเนื้อหมู พบว่าเนื้อหมูสดมีค่า L^* , a^* และ b^* แตกต่างจากเนื้อหมูแช่แข็งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) เนื้อหมูแช่แข็งมีการเปลี่ยนแปลงสีจากสีแดงสดเป็นสีแดงที่มีความคล้ำมากขึ้นและมีสีซีดจาง โดยเนื้อหมูสดมีค่า L^* , a^* และ b^* เท่ากับ 50.57, 4.16 และ 13.72 ตามลำดับ ในช่วงระยะเวลาการแช่แข็งตั้งแต่เดือนที่ 1-6 เนื้อหมูแช่แข็งมีค่า L^* เพิ่มขึ้นอยู่ระหว่าง 54.94-60.34 ค่า a^* เพิ่มขึ้นอยู่ระหว่าง 6.26-7.34 และค่า b^* เพิ่มขึ้นอยู่ระหว่าง 16.90-17.78 โดยค่า L^* ที่เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับเนื้อหมูแช่แข็งที่มีสีซีดจางลง ส่วนค่า a^* และ b^* ที่เพิ่มขึ้นนั้น สอดคล้องกับการเปลี่ยนโทนสีของเนื้อหมู โดยเนื้อหมูสดนั้นมีเนื้อสีแดงสด ส่วนเนื้อหมูแช่แข็งนั้นจะมีสีแดงที่มีความคล้ำกว่า โดยสังเกตจากค่า b^* ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ระยะเวลาการแช่แข็งยังสัมพันธ์กับค่า L^* หรือค่าความ

สว่างของเนื้อหมู โดยเมื่อระยะเวลาในการแช่แข็งนานขึ้นค่า L^* ก็มีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน กล่าวคือเมื่อเก็บรักษาเนื้อหมูในสภาพแช่แข็งนานขึ้น ทำให้สีของเนื้อหมูนั้นมีความซีดจางมากขึ้น เนื่องจากการแช่แข็งที่ทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งในโครงสร้างเส้นใยกล้ามเนื้อ เมื่อนำเนื้อสัตว์มาทำการละลาย ผลึกน้ำแข็งในเส้นใยจะละลายออกมาซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียสี และเกิดการสูญเสียของเม็ดสีที่อยู่ในน้ำเลือดของเนื้อหมู (Kono *et al.*, 2017) นอกจากนี้การแช่แข็งในระยะเวลาที่นานขึ้น ทำให้เนื้อหมูเปลี่ยนจากสีแดงเป็นสีน้ำตาลและมีสีซีดลง (Aroeira *et al.*, 2017) ทั้งนี้เกิดขึ้นจากไมโอโกลบิน (Myoglobin) ซึ่งเป็นรงควัตถุที่ทำให้เนื้อหมูมีสีม่วงแดง (Purplish red) ในภาวะที่มีออกซิเจนจะรวมตัวกับออกซิเจนเป็นออกซีไมโอโกลบิน (Oxymyoglobin) ซึ่งทำให้เนื้อหมูมีสีแดงสด และเมื่อเก็บรักษาเนื้อหมูไว้เป็นระยะเวลานานขึ้น หรือมีการสัมผัสกับอากาศนานขึ้น เนื้อหมูจะเกิดการเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลของเมตไมโอโกลบิน (Metmyoglobin) ด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ และปฏิกิริยานี้ไม่สามารถผันกลับได้ (Rattanapanone, 2014)

Table 1 Changes in color values (L^* , a^* , b^*) of pork meat during freezing storage

Storage time (month)	L^* value	a^* value	b^* value
Fresh pork	50.57±2.23 ^c	4.16±0.68 ^d	13.72±0.81 ^c
1	54.94±1.09 ^b	7.34±1.18 ^a	17.76±0.43 ^a
2	56.88±1.32 ^{ab}	6.69±1.14 ^b	16.90±0.42 ^b
3	59.74±2.20 ^a	7.02±0.48 ^{ab}	17.80±0.70 ^a
4	60.00±3.01 ^a	6.28±1.16 ^c	17.64±0.88 ^a
5	60.34±2.20 ^a	6.92±0.75 ^b	17.78±0.81 ^a
6	59.71±1.36 ^a	6.26±0.35 ^c	17.60±0.48 ^a

Data are expressed as mean values $\pm$ SD values. Mean values $\pm$ SD values with different superscripts in the same column differ significantly at $P \leq 0.05$.

การเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัส

การเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสของเนื้อหมูแช่แข็งที่อุณหภูมิ -40°C เป็นระยะเวลา 6 เดือน ดังแสดงใน Table 2 การวัดเนื้อสัมผัสของเนื้อหมู ซึ่งบันทึกเป็นค่าความแข็ง (Hardness, นิวตัน (N)) ความสามารถในการเกาะรวมตัวกัน (Cohesiveness) ความยืดหยุ่น (Springiness) และความทนต่อการบดเคี้ยว (Chewiness index) พบว่าเนื้อหมูสดมีค่าความแข็ง ความยืดหยุ่น และความทนต่อการบดเคี้ยวแตกต่างจากเนื้อหมูแช่แข็งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) สำหรับค่าความสามารถในการเกาะรวมตัวกันนั้นไม่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาค่าความยืดหยุ่น พบว่าเนื้อหมูสดมีค่าความยืดหยุ่นเท่ากับ 3.71 ซึ่งมากกว่าเนื้อหมูแช่แข็ง โดยค่าความยืดหยุ่นมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการแช่แข็งที่นานขึ้น โดยเนื้อหมูแช่แข็งมีค่าความยืดหยุ่นอยู่ระหว่าง 0.58-1.70 สำหรับค่าความทนต่อการบดเคี้ยวที่บ่งบอกถึงความเหนียวในอาหาร หากมีค่าสูงแสดงว่าเนื้อสัมผัสของอาหารนั้นมีความเหนียวมาก พบว่าเนื้อหมูสดและเนื้อหมู

ที่แช่แข็งเป็นระยะเวลา 1-2 เดือน มีค่าความคงทนต่อการบดเคี้ยวอยู่ระหว่าง 0.58-0.68 และเนื้อหมูเมื่อผ่านการแช่แข็งตั้งแต่ 3 ถึง 6 เดือน มีค่าความคงทนต่อการบดเคี้ยวเพิ่มขึ้นอยู่ระหว่าง 1.42-3.03 เมื่อพิจารณาค่าความแข็ง พบว่าเนื้อหมูที่ผ่านการแช่แข็งเป็นระยะเวลา 4 เดือน มีค่าความแข็งมากที่สุดเท่ากับ 8.88 นิวตัน และเนื้อสัมผัสของเนื้อหมูมีลักษณะแข็งมากที่สุด สอดคล้องกับการทดลองของ Choi *et al.* (2018) ที่พบว่าการแช่แข็งมีผลทำให้เนื้อสัมผัสของเนื้อแกะมีความแข็งและความทนต่อการบดเคี้ยวหรือความเหนียวเพิ่มขึ้น ซึ่งความแข็งและเหนียวของเนื้อแกะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนภายหลังการแช่แข็งไว้เป็นระยะเวลา 3 เดือน มีสาเหตุมาจากการเกิดผลึกน้ำแข็งในโครงสร้างเส้นใยกล้ามเนื้อ และการสูญเสียจากโครงสร้างเส้นใย (Kono *et al.*, 2017) นอกจากนี้การเสียดสีของเส้นใยไมโอซินที่เป็นผลจากผลึกน้ำแข็ง และการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันยังมีส่วนทำให้เนื้อสัมผัสของเนื้อสัตว์มีความแข็งเพิ่มขึ้น และการอุ้มน้ำลดลง (Kennedy, 2000)

Table 2 Changes in texture profile of pork meat during freezing storage

Storage time (month)	Texture properties			
	Hardness (N)	Cohesiveness ^{ns}	Springiness index	Chewiness index
Fresh pork	4.76±0.84 ^{cd}	0.50±0.06	3.71±1.45 ^a	0.68±0.05 ^b
1	5.11±3.97 ^c	0.48±0.06	1.70±1.49 ^b	0.58±0.15 ^b
2	3.63±1.34 ^e	0.48±0.03	0.62±0.03 ^c	0.58±0.15 ^b
3	4.30±1.74 ^{de}	0.47±0.04	0.63±0.08 ^c	1.42±0.64 ^{ab}
4	8.88±2.91 ^a	0.46±0.07	0.59±0.05 ^c	3.03±1.55 ^a
5	8.55±2.55 ^{ab}	0.46±0.04	0.61±0.05 ^c	3.02±1.99 ^a
6	8.17±2.39 ^b	0.45±0.03	0.58±0.05 ^c	2.53±1.25 ^{ab}

Data are expressed as mean values ± SD values. Mean values ± SD values with different superscripts in the same column differ significantly at $P \leq 0.05$; ns = not significant ($P > 0.05$).

การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค

การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคของเนื้อหมูสดและเนื้อหมูที่ผ่านการแช่แข็งที่อุณหภูมิ -40°C . เป็นระยะเวลา 6 เดือน เมื่อนำเนื้อหมูแช่แข็งมาละลายที่อุณหภูมิ 4°C . และนำมาวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า ดังแสดงใน Figure 1 พบว่าในภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของเนื้อหมูสด (Figure 1A) แสดงโครงสร้างของเส้นใยกล้ามเนื้อที่มีเส้นใยเล็ก ๆ สานตัวกันเป็นอย่างดี ส่วนในภาพถ่ายของเนื้อหมูที่แช่แข็งเป็นระยะเวลา 1 และ 2 เดือน (Figure 1B-C) พบว่าเส้นใยเล็ก ๆ ที่สานตัวกันอยู่เริ่มลดลง และมีรูโหว่ของผลึกน้ำแข็งเกิดขึ้น สำหรับภาพถ่ายของเนื้อหมูที่แช่แข็งเป็นระยะเวลา 3-6 เดือน (Figure 1D-G) นั้น ไม่พบเส้นใยเล็ก ๆ แล้ว และมีรูโหว่ของผลึกน้ำแข็งมีขนาดใหญ่ขึ้น แสดงให้เห็นว่าการเก็บรักษาในสภาพแช่แข็งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของ

เส้นใยกล้ามเนื้อของเนื้อหมู ซึ่งการแช่แข็งในระยะเวลานานขึ้น จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างเส้นใยกล้ามเนื้อมากขึ้น โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเส้นใยกล้ามเนื้อที่แสดงถึงการเสื่อมสภาพของเนื้อหมู ถูกสังเกตได้อย่างชัดเจนเมื่อระยะเวลาผ่านไป 3 เดือน โดยการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคนั้นสอดคล้องกับค่าความแข็งที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ค่าความยืดหยุ่นที่มีแนวโน้มลดลง และความคงทนต่อการบิดเคี้ยวหรือความเหนียวที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในเนื้อหมูที่เก็บรักษาในสภาพแช่แข็งเป็นระยะเวลานานขึ้น โดยการแช่แข็งนั้นจะก่อให้เกิดผลึกน้ำแข็งขึ้นในเส้นใยกล้ามเนื้อของเนื้อสัตว์ เมื่อนำเนื้อสัตว์มาทำการละลาย ผลึกน้ำแข็งในเส้นใยจะละลายออกมาก ซึ่งนอกจากจะส่งผลให้เกิดการสูญเสียน้ำ ยังทำให้คุณภาพทางด้านเนื้อสัมผัสของเนื้อสัตว์ลดลง ซึ่งเกิดขึ้นในลักษณะเดียวกันทั้งเนื้อวัว เนื้อหมู เนื้อไก่ และเนื้อปลา (Mousavi *et al.*, 2007; Tippala *et al.*, 2021)

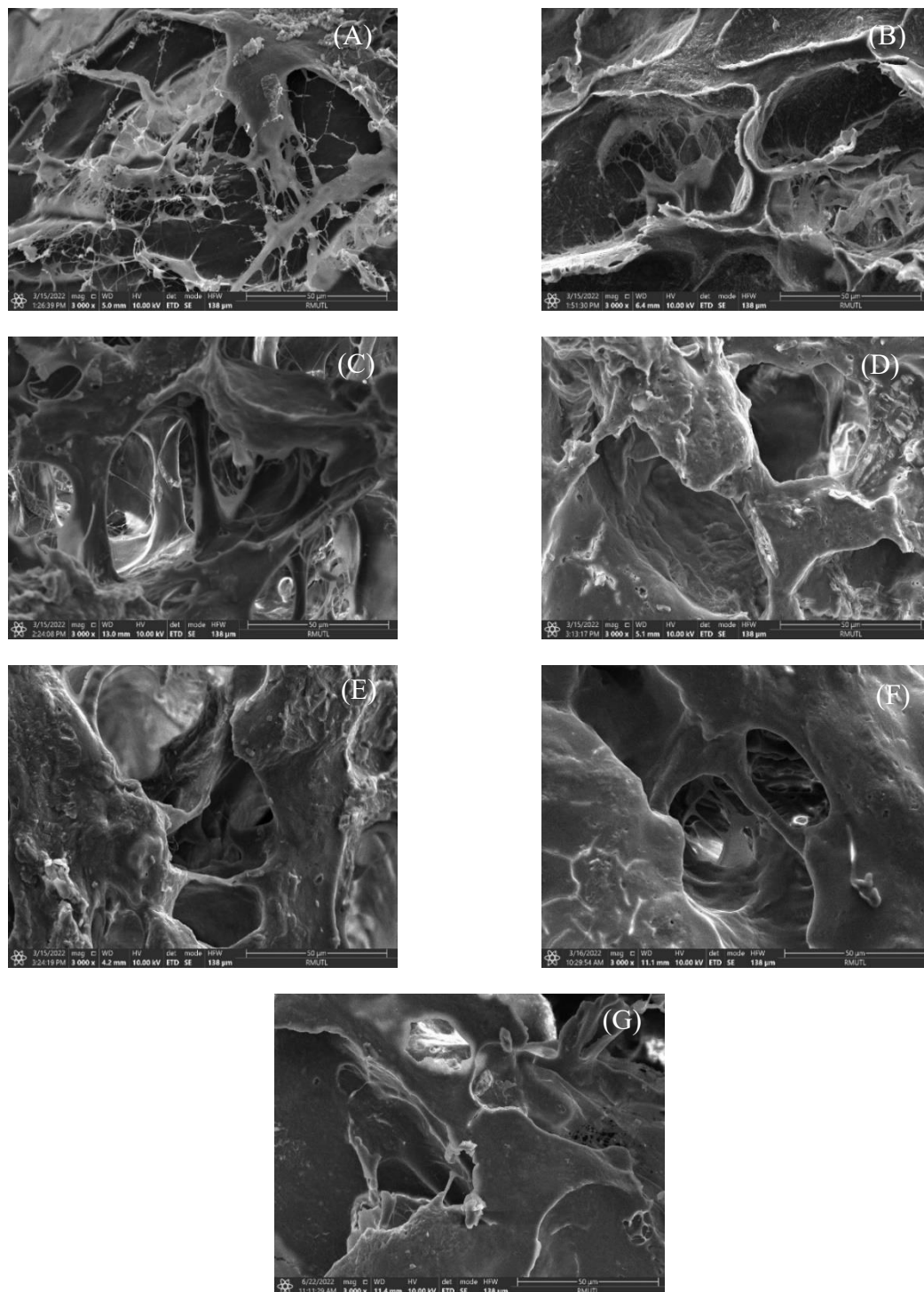


Figure 1 Microstructure of fresh pork (A) and frozen pork after storage for 1 month (B), 2 months (C), 3 months (D), 4 months (E), 5 months (F) and 6 months (G) at 3000x magnification

การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดต่าง

จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชพบว่า ค่าพีเอชของเนื้อหมูสดและเนื้อหมูที่ผ่านการแช่แข็ง มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ดังแสดงใน Table 3 ค่าพีเอชของเนื้อหมูสดมีค่าเท่ากับ 5.57 เนื้อหมูแช่แข็งเป็นระยะเวลา 1 เดือน มีค่าพีเอชเพิ่มขึ้นเป็น 6.11 และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นไปจนถึงเดือนที่ 4 และลดลงเล็กน้อยเหลือ 5.57 และ 5.70 ในเดือนที่ 5 และ 6 ทั้งนี้เนื่องจากในช่วงระยะเวลา 4 เดือนแรก การแช่แข็งจะสามารถยับยั้งกิจกรรมของจุลินทรีย์ได้ แต่ปฏิกิริยาของเอนไซม์ยังคงดำเนินไปอย่างช้า ๆ จึงส่งผลให้เนื้อหมูเกิดการย่อยสลายตัวเอง ซึ่งทำให้ค่าพีเอชเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในเดือนที่ 5 และ 6 ของการเก็บรักษาในสภาพแช่แข็ง ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Wei *et al.* (2017) ที่ศึกษาผลของระยะเวลาแช่แข็งต่อค่าพีเอชของเนื้ออกไก่ โดยพบว่าค่าพีเอชของเนื้ออกไก่สดมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 6.09 และเมื่อผ่านการแช่แข็งเป็นระยะเวลา 8 เดือน ค่าพีเอชของเนื้ออกไกลดลงเหลือ 5.57 ซึ่งจากการศึกษาก่อนหน้านั้นที่แสดงให้เห็นว่าการแช่แข็งมีผลทำให้เกิดการสูญเสียของเนื้อสัตว์ ซึ่งอาจเป็นสาเหตุของความเข้มข้นของตัวทำละลายที่เพิ่มขึ้น ที่ส่งผลต่อการลดลงของค่าพีเอชในเนื้อสัตว์ (Wei *et al.*, 2017)

นอกจากนี้การลดลงของค่าพีเอชในเนื้อสัตว์ระหว่างการเก็บรักษาในสภาพแช่แข็งนั้น อาจเกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของไกลโคเจนภายในกล้ามเนื้อที่ถูกเปลี่ยนเป็นกรดแลกติก ซึ่งทำให้เนื้อสัตว์มีค่าพีเอชลดลงหรือมีความเป็นกรดเพิ่มขึ้น และยังส่งผลต่อความสามารถในการอุ้มน้ำที่ลดลงของเนื้อสัตว์แช่แข็งเช่นกัน (Przybylski *et al.*, 2006) นอกจากการแช่แข็งจะทำให้โปรตีนในเนื้อสัตว์เสียสภาพธรรมชาติแล้ว ยังเป็นเหตุให้เกิดการปลดปล่อยโปรตอนไฮออน (H^+) อาจส่งผลให้ค่าพีเอชลดลง (Leygonie *et al.*, 2012; Ali *et al.*, 2015)

การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นและการสูญเสียน้ำจากการทำละลายน้ำแข็ง

ความชื้นของเนื้อหมูสดและเนื้อหมูแช่แข็ง มีปริมาณอยู่ในช่วงระหว่าง 74.09-75-79 (Table 2) ซึ่งไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ซึ่งพบว่าปริมาณความชื้นของเนื้อหมูไม่มีการเปลี่ยนแปลงระหว่างการเก็บรักษาในสภาพแช่แข็ง การสูญเสียน้ำจากการทำละลายน้ำแข็ง (Thawing loss) ของเนื้อหมูแช่แข็งเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลา 6 เดือน (Table 2) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhang *et al.* (2022) ที่รายงานว่าระยะเวลาการแช่แข็งที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการสูญเสียน้ำจากการทำละลายน้ำแข็งของเนื้อวัวที่เพิ่มขึ้น โดยเนื้อวัวที่แช่แข็งในระยะเวลาที่นานกว่าจะมีการสูญเสียน้ำจากการทำละลายน้ำแข็งที่สูงกว่า Choi *et al.* (2018) พบว่าเนื้อแกะแช่แข็งมีการสูญเสียน้ำจากการทำละลายน้ำแข็งเพิ่มขึ้น ความสามารถในการอุ้มน้ำลดลง และเนื้อสัมผัสแข็งขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อแกะสด เนื่องจากในระหว่างการแช่แข็งจะมีการทำลายโครงสร้างเส้นใยของกล้ามเนื้อให้เกิดความเสียหาย ซึ่งสอดคล้องกับภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคที่แสดงให้เห็นรูโหว่ที่เกิดจากผลึกของน้ำแข็ง ที่ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำจากการทำละลายน้ำแข็งของเนื้อสัตว์ในปริมาณที่สูงขึ้น (Zhang *et al.*, 2022)

การเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีนและไขมัน

การเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีนของเนื้อหมูสดและเนื้อหมูแช่แข็ง ดังแสดง Table 2 พบว่ามีปริมาณโปรตีนอยู่ในช่วงระหว่าง 20.05-24.40 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของปริมาณโปรตีนในเนื้อหมูสดและเนื้อหมูแช่แข็งไม่ชัดเจน โดยผลการทดลองข้างต้นชี้ให้เห็นถึงการแช่แข็งที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเส้นใยในเนื้อหมู ซึ่งการแช่แข็งอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนสภาพโปรตีนเท่านั้น นอกจากนี้

เนื้อหมูที่นำมาวิเคราะห์นั้นมาจากเนื้อคนละส่วนกัน จึงอาจส่งผลทำให้มีปริมาณโปรตีนที่แตกต่างกัน ทำให้ไม่เห็นแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีนระหว่างการแช่เยือกแข็งที่ชัดเจน ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยของ Wu *et al.* (2021) ที่รายงานว่า การแช่แข็งมีผลทำให้ปริมาณโปรตีนเนื้อสัตว์ลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากการสูญเสียโครงสร้างเส้นใย การสูญเสียสภาพของโปรตีน และการรวมตัวกันของโปรตีนในระหว่างการแช่เยือกแข็ง นอกจากนี้การลดลงของปริมาณโปรตีนอาจเกิดขึ้นพร้อมกับการสูญเสียน้ำในระหว่างการทำละลายเนื้อสัตว์ภายหลังการแช่เยือกแข็ง การเก็บรักษาปลาฟิงค์เพิร์ชและปลาชาตินในน้ำแข็งก่อนนำไปต้มและแปรรูป ทำให้ค่าการละลายของโปรตีนลดลง (Protein solubility) ความสามารถในการเกิดอิมัลชันลดลง (Emulsion stability) และความสามารถในการจับยืดยึดน้ำลดลงเช่นกัน (Water binding stability) (Reddy

et al., 1995) ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงการสูญเสียของโปรตีนกล้ามเนื้อของเนื้อสัตว์ จากการเก็บรักษาในสภาพแช่แข็ง (Chantararat *et al.*, 2005)

จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณไขมันของเนื้อหมูสดและเนื้อหมูที่ผ่านการแช่แข็ง พบว่ามีปริมาณแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ดังแสดงใน Table 3 เนื้อหมูสดและเนื้อหมูแช่แข็งเป็นระยะเวลา 1 เดือน มีปริมาณไขมันเท่ากับ 1.23 และ 1.27 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ภายหลังการเก็บรักษาในสภาพแช่แข็งเป็นระยะเวลาตั้งแต่ 2 ถึง 6 เดือน เนื้อหมูแช่แข็งมีปริมาณไขมันลดลงอยู่ระหว่าง 0.69-0.25 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณไขมันที่ลดลงอย่างต่อเนื่องในเนื้อหมูแช่แข็ง เกิดจากการสลายของลิพิดในเนื้อสัตว์ ซึ่งเกิดขึ้นโดยเอนไซม์ลิเพสและฟอสโฟลิพิดของเนื้อสัตว์ (Hussein *et al.*, 2020)

Table 3 Changes in chemical properties of pork meat during freezing storage

Storage time (month)	pH	%MC _{wb} ^{ns}	Thawing loss (%)	Protein content (%)	Fat content (%)
Fresh pork	5.57±0.06 ^c	74.62±0.08	-	22.75±0.07 ^a	1.23±0.06 ^a
1	6.11±0.09 ^b	75.71±1.61	4.21±0.12 ^e	20.55±0.07 ^b	1.27±0.04 ^a
2	6.27±0.05 ^b	74.79±0.21	4.89±0.02 ^d	20.40±0.57 ^b	0.69±0.04 ^b
3	6.90±0.04 ^a	74.09±0.69	5.60±0.11 ^c	24.40±0.00 ^a	0.60±0.01 ^b
4	7.02±0.15 ^a	75.18±0.12	5.74±0.22 ^c	22.71±0.14 ^a	0.45±0.02 ^c
5	5.57±0.06 ^c	74.90±0.48	7.36±0.21 ^b	20.05±0.35 ^b	0.25±0.01 ^d
6	5.70±0.21 ^c	75.79±27.41	8.05±0.33 ^a	24.05±1.20 ^a	0.34±0.01 ^{cd}

Data are expressed as mean±SD. Mean±SD with different superscripts in the same column differ significantly at $P < 0.05$;

ns = not significant ($P > 0.05$).

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาผลของการเก็บรักษาในสภาพแช่แข็งต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของเนื้อหมู พบว่าการเก็บรักษาเนื้อหมูในสภาพแช่แข็งที่อุณหภูมิ -40°C . เป็นระยะเวลา 6 เดือน ทำให้เนื้อหมูเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทั้งทางกายภาพและเคมีที่ส่งผลต่อคุณภาพของเนื้อหมู ดังนี้ ระหว่างการเก็บรักษาในสภาพแช่แข็ง เนื้อหมูมีเปลี่ยนแปลงสีจากสีแดงสดเป็นสีโทนแดงที่มีความคล้ำมากขึ้นและมีสีซีดจางโดยเนื้อหมูแช่แข็งมีค่า L^* , a^* และ b^* เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อหมูสด การเก็บรักษาในสภาพแช่แข็งทำให้ลักษณะเนื้อสัมผัสของเนื้อหมูเปลี่ยนแปลงไป โดยเนื้อหมูแช่แข็งมีค่าความยืดหยุ่นลดลง มีค่าความคงทนต่อการบดเคี้ยวที่บ่งบอกถึงความเหนียวเพิ่มขึ้น และค่าความแข็งเพิ่มขึ้นโดยการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสจะเห็นได้อย่างชัดเจนภายหลังการแช่แข็งไว้เป็นระยะเวลา 3 เดือน ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคค่าพีเอชของเนื้อหมูแช่แข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นไปจนถึงเดือนที่ 4 และลดลงเล็กน้อยหลังจากนั้น เนื้อหมูสดและเนื้อหมูแช่แข็งมีปริมาณความชื้นไม่แตกต่างกัน การสูญเสียน้ำจากการทำละลายน้ำแข็งของเนื้อหมูเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลา การแช่แข็ง ปริมาณโปรตีนในเนื้อหมูแช่แข็งไม่มีการเปลี่ยนแปลง ปริมาณไขมันในเนื้อหมูลดลงภายหลังการแช่แข็งเป็นเวลา 2 เดือน การนำเนื้อหมูแช่แข็งมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ไส้กรอก ไม่ควรใช้เนื้อหมูที่เก็บรักษาไว้นานเกิน 3 เดือน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทั้งทางด้านกายภาพและเคมีที่เกิดขึ้นจะมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งในผลงานจากโครงการวิจัยรหัสโครงการ 2301875 ซึ่งได้รับทุนงบประมาณด้านวิจัย

และนวัตกรรม ประเภท Fundamental Fund ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2565 จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภายใต้งบประมาณอุดหนุนโครงการวิจัย พ.ศ. 2565 จากสำนักงานคณะกรรมการการวิทยาศาสตร์วิจัยและนวัตกรรม (สกว.)

เอกสารอ้างอิง

- Ali, S., W. Zhang, N. Rajput, M. Ammar Khan, C. Li and G. Zhou. 2015. Effect of multiple freeze-thaw cycles on the quality of chicken breast meat. **Food Chemistry** 173: 808-814.
- AOAC. 2000. **Official Methods of Analysis of AOAC International**. 17th Edition. Gaithersburg, Maryland: AOAC International.
- Aroeira, C.N., R.A.T. Filho, P.R. Fontes, A.L.S. Ramos, L.A.M. Gomide, M.M. Ladeira and E.M. Ramos. 2017. Effect of freezing prior to aging on myoglobin redox forms and CIE color of beef from Nellore and Aberdeen Angus cattle. **Meat Science** 125: 16-21.
- Chantararat, P., K. Kijroongrojana and M. Vittayanont. 2005. Effect of ice storage on muscle protein properties and qualities of emulsion fish sausage from bigeye snapper (*Priacanthus tayenus*) and lizardfish (*Saurida undosquamis*). **Songklanakarin Journal of Science and Technology** 27(1): 123-138.

- Choi, M.J., T. Abduzukhurov, D. Park, E. Kim and G.P. Hong. 2018. Effects of deep freezing temperature for long-term storage on quality characteristics and freshness of lamb meat. **Korean Journal for Food Science of Animal Resources** 38(5): 959-969.
- Etheridge R.D., G.M. Pesti and E.H. Foster. 1998. A comparison of nitrogen values obtained utilizing the Kjeldahl nitrogen and Dumas combustion methodologies (Leco CNS 2000) on samples typical of an animal nutrition analytical laboratory. **Journal of Animal Feed Science and Technology** 73: 21-28.
- Huidobro, F.R, E. Miguel, B. Blázquez and E. Onega. 2005. A comparison between two methods (Warner Bratzler and texture profile analysis) for testing either raw meat or cooked meat. **Meat Sci** 69(3): 527-536.
- Hussein, H.A., M.N. Salman and A.M. Jawad. 2020. Effect of freezing on chemical composition and nutritional value in meat. **Drug Invention Today** 13(2): 329-333.
- Kennedy, C.J. 2000. **Managing Frozen Foods**. Sawston: Woodhead Publishing. 304 p.
- Kono, S., M. Kon, T. Araki and Y. Sagara. 2017. Effects of relationships among freezing rate, ice crystal size and color on surface color of frozen salmon fillet. **Journal of Food Engineering** 214: 158-165.
- Leygonie, C., T.J. Britz and L.C. Hoffman. 2012. Impact of freezing and thawing on the quality of meat. **Review Meat Science** 91(2): 93-98.
- McGuire, R.G. 1992. Reporting of objective colour measurement. **HortScience** 27(12): 1254-1255.
- Medic, H., I.D. Kusec, J. Pleadin, L. Kozacinski, B. Njari, B. Hengl and G. Kusec. 2018. The impact of frozen storage duration on physical, chemical and microbiological properties of pork. **Meat Science** 140: 119-127.
- Mortensen, M., H.J. Andersen, S.B. Engelsen and H.C. Bertram. 2006. Effect of freezing temperature, thawing and cooking rate on water distribution in two pork qualities. **Meat Science** 72(1): 34-42.
- Mousavi, R., T. Miri, P.W. Cox and P.J. Fryer. 2007. Imaging food freezing using X-ray microtomography. **International Journal of Food Science and Technology** 42: 714-727.
- Przybylski, W., G. Monin, M. Koćwin-Podsiadła and E. Krzecio. 2006. Glycogen metabolism in muscle and its effects on meat quality in pigs. **Journal of Food and Nutrition Sciences** 56(3): 257-262.

- Rattanapanone, N. 2014. **Food Chemistry**. 5th Edition. Bangkok: Odeon Store Publisher. 504 p. [in Thai]
- Reddy, G.V.S., L.N. Srikar, B.K. Khuntia and N. Vinaykumar. 1995. Effect of pre-process storage in ice on the chemical characteristics of fish mince. **Journal of Food Science and Technology** 32: 315-319.
- Russell, A.B., P.E Cheney and S.D Wantling. 1999. Influence of freezing conditions on ice crystallization in ice cream. **Journal of Food Engineering** 39(2): 179-191.
- Tippala, T., N. Koomkrong and A. Kayan. 2021. Influence of freeze-thawed cycles on pork quality. **Animal Bioscience** 34(8): 1375-1381.
- Wei, R., P. Wang, M. Han, T. Chen, X. Xu and G. Zhou. 2017. Effect of freezing on electrical properties and quality of thawed chicken breast meat. **Asian-Australasian Journal of Animal Sciences** 30(4): 569-575.
- Wu, Z., W. Ma, Z. Xian, Q. Liu, A. Hui and W. Zhang. 2021. The impact of quick-freezing methods on the quality, moisture distribution and microstructure of prepared ground pork during storage duration. **Ultrasonics Sonochemistry** 78: 105707.
- Zhang, Y., Y.H.B. Kim, E. Puolanne and P. Ertabjerg. 2022. Role of freezing-induced myofibrillar protein denaturation in the generation of thaw loss: a review. **Meat Science** 190: 108841.